مجله تحقيقات آب و خاک ايران (۴۳) ۲, ۱۳۹۱ (۱۳۷-۱۲۹)

توسعه و کاربرد الگوريتم ترکيبي NLP-GA در طراحي و بهره‌برداري بهينه از ايستگاه‌هاي پمپاژ

سولماز رسول زاده غريبدوستي[۱] و اميد بزرگ حداد[۲]*
[۱] دانشجوي کارشناسي ارشد و [۲] دانشيار پرديس کشاورزي و منابع طبيعي دانشگاه تهران
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۸/۱۰/۱۵- تاريخ تصويب: ۱۳۹۱/۳/۲۳)

چکيده

پمپها از جمله اولين وسايلي هستند که بشر براي بهره‌گيري هر چه بهتر از منابع آب آنها را اختراع کرده است. مسئله طراحي و بهره‌برداري بهينه از ايستگاه‌هاي پمپاژ اغلب از نوع مدل‌هاي غيرخطي آميخته با اعداد صحيح بوده و استفاده از روش‌هاي بهينه‌سازي بر مبناي مشتقات و گراديانهاي توابع موجود در حل اينگونه مسائل کارائي مطلوبي ندارد. جهت حل پيچيدگي‌هاي موجود در اين‌گونه مسائل، الگوريتم‌هاي تکاملي از قبيل الگوريتم ژنتيک (GA) در بسياري از مقوله‌هاي علمي و از جمله مسائل طراحي و بهره‌برداري از ايستگاه‌هاي پمپاژ به عنوان ابزارهاي جستجو و بهينه‌سازي مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما اين روش‌ها در کنار تمام قابليت‌هايي که دارا مي‌باشند، در يافتن جواب در مدل‌هاي بزرگ مقياس زمان طولاني‌اي را صرف کرده و در نهايت جواب‌هاي نزديک به بهينه سراسري را نتيجه مي‌دهند. در اين تحقيق سعي بر آنست که با ترکيب دو روش برنامه‌ريزي غيرخطي (NLP) و GA و ابداع يک الگوريتم ترکيبي جديد، پس از بررسي يك مسئله رياضي ايستگاه پمپاژ به گونه‌اي طراحي و بهره‌برداري شود که مؤلفه‌هاي مختلف سامانه بهينه‌سازي و به‌گزيني شوند. در نهايت نتايج اين الگوريتم با نتايج الگوريتمهاي بهينه‌سازي جفت گيري زنبور عسل (HBMO)، GA و همچنين نتايج روش‌هاي NLP و روش مضارب لاگرانژ (LM) مقايسه شده است. نتايج کاربرد اين الگوريتم تلفيقي نشان مي‌دهد که الگوريتم ترکيبي به لحاظ کيفيت جوابهاي حاصل و تعداد دفعات ارزيابي تابع هدف و همگرايي به پاسخ بهينه (زمان اجرا)، عملکرد بهتري نسبت به هر يك از روشهاي ذکر شده داشته است.

واژه‌هاي کليدي: بهينه‌سازي، الگوريتم ژنتيک، برنامه‌ريزي غيرخطي، طراحي و بهره‌برداري ايستگاه پمپاژ

مقدمه

امروزه امنيت غذايي يکي از مهمترين مقوله‌هاي مطرح در کشورها مي‌باشد و در نتيجه لزوم فراهم نمودن آب مورد نياز براي مصارف مختلف از جمله کشاورزي، آشاميدني و ... داراي اهميت ويژه‌اي مي‌باشد. بنابراين امر آبرساني بايد بر طبق يک برنامه دقيق و از پيش طراحي شده انجام گيرد تا هم اين نياز حياتي به ميزان و دقت کافي برطرف گردد و هم از نقطه نظر ديگر هزينه انجام اين کار بيهوده بالا نرود و از مصرف بيهوده انرژي جلوگيري شود تا آب مصرفي با قيمت پايين‌تر به دست مصرف‌کننده برسد. در اين ميان پمپ‌ها از جمله اولين وسايلي هستند که بشر براي بهره‌گيري هرچه بهتر از منابع آبي از آنها استفاده نموده است. بالا بودن هزينه‌هاي احداث، بهره‌برداري و نگهداري از ايستگاه‌هاي پمپاژ، از طرف ديگر انرژي مصرفي در پمپاژ آب، باعث به وجود آمدن انگيزه تحقيق در زمينه طراحي و بهره‌برداري بهينه از ايستگاه‌هاي پمپاژ شده است. مسئله طراحي و بهره‌برداي بهينه همزمان از ايستگاه‌هاي پمپاژ داراي پيچيدگي‌هايي مي‌باشد. از طرف ديگر اينگونه مسائل از لحاظ رياضي، جزء مسائل غيرخطي بزرگ مقياس مي‌باشند. زيرا تابع هدف و قيود مسئله غير خطي بوده و تعداد متغيرهاي تصميم و قيودات مسئله نيز زياد مي‌باشند. تابع هدف چنين مسئله‌اي به حداقل رساندن هزينه‌هاي طراحي و بهره‌برداري از ايستگاه‌هاي پمپاژ در طول يک افق برنامه‌ريزي است که سامانه در طي آن مدت آب را پمپاژ مي‌کند.

در زمينه طراحي و بهره‌برداري از ايستگاه‌هاي پمپاژ تحقيقات زيادي صورت گرفته است. در برخي از اين تحقيقات از برنامه‌ريزي پويا به منظور بهره‌برداري بهينه ايستگاه‌هاي پمپاژ استفاده شده است. از آنجا که کاربرد برنامه‌ريزي پويا در زمينه بهينه‌سازي ايستگاه‌هاي پمپاژ با موفقيت زيادي توأم نبوده و محدوديت بسيار شديدي بر ابعاد و اندازه مسئله تحميل کرده است، محققان روشهاي ديگري را براي بهينه‌سازي ايستگاه‌هاي پمپاژ معرفي نموده‌اند. يکي از روش‌هاي سنتي بهينه‌سازي، روش برنامه‌ريزي غير خطي (NLP) مي‌باشد. بدين منظور، Ormsbee et al. (1989) از NLP براي تعيين عملکرد بهينه سامانه پمپاژ شبکه توزيع آب همراه با مخازن ذخيره چندگانه

* نويسنده مسئول: Obhadad@ut.ac.ir

استفاده کردند. همچنین Moradi-Jalal et al. (2003) با استفاده از روش مضارب لاگرانژ به بهینه‌سازي طراحي و بهره‌برداري از ایستگاههاي پمپاژ پرداختند.

اما این روش نیز خود داراي ضعف‌هایي از جمله گیر افتادن در محدوده‌اي محصور و ناتواني در دست‌یابي به پاسخ بهینه سراسري در مسائل بزرگ مقیاس بود. از آنجا که خطي‌سازي مسائل بهینه‌سازي طراحي و بهره‌برداري از ایستگاه‌هاي پمپاژ امکان‌پذیر نمي‌باشد و از طرفي حل مسئله با استفاده از NLP به علت وجود پیچیدگي توابع موجود در مدل و آمیخته بودن مسئله با اعداد صحیح به علت انتخاب نوع پمپ‌ها داراي پیچیدگي‌هاي زیادي مي‌باشد، از روش‌هاي فراکاوشي به منظور بهینه‌سازي این ایستگاه‌ها استفاده شده است. توانایي این روش‌ها جهت یافتن جواب‌هاي مناسب حتي زماني که توابع مدل غیرخطي، ناپیوسته و غیرمشتق پذیر هستند باعث توجه روز افزون به آنها گشته است. این الگوریتم‌ها تقریبي و اغلب غیر قطعي مي‌باشند و مي‌توانند با استفاده از راهکارهایي، از گیر افتادن در محدوده‌اي محصور در قسمتهایي از فضاي جستجو رهایي یابند. براي نمونه، Mackle et al. (1995) در زمینه بهره‌برداري بهینه (کاهش هزینه برق مصرفي) ایستگاه‌هاي پمپاژ از الگوریتم ژنتیک (GA, Genetic Algorithm) به عنوان الگوریتم بهینه‌ساز استفاده کردند. Moradi-Jalal & Rodin (2002) با استفاده از (GA)، بهینه‌سازي ایستگاه‌هاي پمپاژ را براي کمینه کردن هزینه در طول یک شبانه روز انجام دادند. Moradi-Jalal et al. (2004) با استفاده از GA برنامه‌اي را براي بهینه‌سازي ایستگاه‌هاي پمپاژ آب کشاورزي ارائه نمودند. Bozorg Haddad & Marino (2007) با استفاده از توابع جریمه پویا و ایستا و با بکارگیري الگوریتم بهینه‌سازي جفت گیري زنبورعسل (HBMO, Honey Bee Maiting) به بهینه‌سازي طراحي و بهره‌برداري ایستگاه‌هاي پمپاژ پرداختند. Rajabpour & Afshar (2008) با استفاده از الگوریتم اجزاء جمعي (PSO, Particle Swarm Optimization) بهینه‌سازي بهره‌برداري از ایستگاه‌هاي پمپاژ متوالي را انجام دادند.

همان طور که مشاهده شد تاکنون از GA و دیگر الگوریتم‌هاي فراکاوشي در مسائل بهینه‌سازي ایستگاه‌هاي پمپاژ استفاده‌هاي زیادي شده است. اما استفاده از الگوریتم‌هاي فراکاوشي در حل مسائل موجود در مهندسي آب نیز داراي مشکلاتي از قبیل زمان‌بر بودن و نتیجه دادن جواب نزدیک به بهینه سراسري مي‌باشند. لذا به نظر مي‌رسد استفاده از الگوریتمهاي ترکیبي که در آنها هم از مزایاي سرعت روش‌هاي NLP و هم از مزایاي جستجوي هوشمند الگوریتم‌هاي تکاملي استفاده مي‌شود، مي‌تواند در صورت فرمول‌بندي صحیح مسئله بسیار کمک‌کننده باشد و مشکلات روش‌هاي NLP و الگوریتم‌هاي تکاملي را از بین ببرد.

در زمینه الگوریتمهاي ترکیبي گرادیان پایه و ژنتیک، Reis et al. (2005) به مقایسه مدل ترکیبي GA- برنامه‌ریزي خطي (LP-GA) با مدل برنامه‌ریزي پویاي تفاضلي تصادفي (SDDP)پرداختند و مشاهده کردند که مدل ترکیبي نتایج رضایت‌بخشي نسبت به نتایج SDDP بدست آورده است. Attarzadeh et al. (2008) با استفاده از الگوریتم ترکیبي LP-GA به تعیین ظرفیت بهینه مخزن سد با اعمال کنترل روي اعتمادپذیري تأمین نیاز پرداختند. آنها این الگوریتم را براي حل مسئله بهینه‌سازي از نوع برنامه‌ریزي خطي آمیخته با اعداد صحیح (MILP) ابداع کردند و قسمت اعداد صحیح را توسط GA بهینه‌سازي کردند و بقیه مدل را که به صورت یک مسئله برنامه‌ریزي خطي مانده بود، توسط مدل LP بهینه‌سازي کردند. Cisty (2009)، با استفاده از الگوریتم ترکیبي LP-GA به بهینه‌سازي یک شبکه توزیع آب پرداخت. او در مدل پیشنهادیش از GA براي تجزیه کردن شبکه‌هاي با حلقه‌هاي پیچیده به گروهي از شبکه‌هاي شاخه‌اي استفاده کرد. سپس مدل LP را در بهینه‌سازي هر شبکه شاخه‌اي تولید شده توسط مدل GA به کار برد.

همانطور که مشاهده شد در مطالعات ذکر شده در زمینه الگوریتم‌هاي ترکیبي کاوشي و گرادیان پایه، فقط بخشي از مسئله توسط مدلهاي گرادیان پایه بهینه شده است و بخش دیگر مسئله توسط الگوریتم تکاملي بهینه شده است. در هیچ کدام از مطالعات، استفاده توأم از هر دو روش در هر تکرار به منظور کوتاه کردن زمان محاسبات به چشم نمي‌خورد.

در این تحقیق به بهینه‌سازي یك مسئله ریاضي و همچنین طراحي و بهره‌برداري همزمان یک ایستگاه پمپاژ پرداخته شده است. در این راستا، سعي شده است که با ترکیب دو روشNLP و GA و بکارگیري هر دو روش در هر تکرار براي تولید جواب‌هاي اولیه یکدیگر و استفاده از مزایاي هر کدام از روش‌ها، یک الگوریتم مناسب که در بر گیرنده تمام شرایط و متغیرهاي مطرح شده باشد تهیه شود. الگوریتم ترکیبي تهیه شده قادر است بر مبناي هیستوگرام مصرف که نشان دهنده دبي مورد نیازي است که باید توسط سامانه، پمپاژ شود، متغیرهاي طراحي ایستگاه‌هاي پمپاژ شامل تعداد و نوع پمپ‌هاي مصرفي و همچنین متغیرهاي بهره‌برداري شامل عملکرد هر کدام از پمپ‌هاي مورد استفاده در طول زمان بهره‌برداري را به گونه‌اي بهینه‌سازي کند که هزینه‌هاي

سرمايه‌گذاري و مصرف انرژي كمينه شود. لازم به ذكر است كه در ابتدا يك مسئله رياضي توسط اين روش حل شده و بررسي مطالعه موردي پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

برنامه‌ريزي غير خطي **(NLP)**

فرض اصلي برنامه‌ريزي خطي اين است كه همه توابع اعم از تابع هدف يا محدوديت ها خطي باشند. اگر چه اين فرض در بسياري از مسائل واقعي برقرار است، ليكن در موارد زيادي هم صادق نيست. اغلب اقتصاددانان دريافتند كه در مسائل برنامه‌ريزي اقتصادي، غيرخطي بودن توابع يک قاعده كلي است از اين رو گستردگي دامنه كاربردهاي برنامه‌ريزي غيرخطي ايجاب مي‌كند كه‌اين مقوله مهم نيز مورد توجه قرار گيرد.

هدف مسائل برنامه‌ريزي غيرخطي در شكل كلي آن پيدا كردن مقادير $X = (x_1, x_2, ..., x_n)$ است، به طوريكه:

$$\begin{aligned} &Max.\ f(X) \\ &g_i(X) \leq b_i \qquad i = 1,2,...,m \\ &X \geq 0 \end{aligned} \qquad (۱)$$

كه در آن $f(X)$ و $g_i(X)$ = توابعي معلوم و غيرخطي از n متغير تصميم كه $f(X)$ = تابع هدف و $g_i(X)$ = قيد مربوط به متغيرهاي تصميم مسئله مي‌باشند (Hillier and Liberman, 1980). الگوريتم‌هاي حل بسيار قوي‌اي كه در حل اين مسائل مطرح شده‌اند، عبارتند از: برنامه‌ريزي خطي متوالي (SLP)، برنامه‌ريزي درجه دوم متوالي (SQP) (يا روش لاگرانژين پيشنهادي)، روش لاگرانژين تكاملي و روش گراديان كاهشي (GRG). برنامه‌ريزي غيرخطي امكانات بسيار مناسبي براي تعريف مسئله در اختيار مدل‌ساز قرار ميدهد. از معايب اين روش مي‌توان به حجم محاسباتي بسيار بالا و در برخي موارد توقف نمودن در يک بهينه موضعي اشاره نمود.

الگوريتم ژنتيک **(GA)**

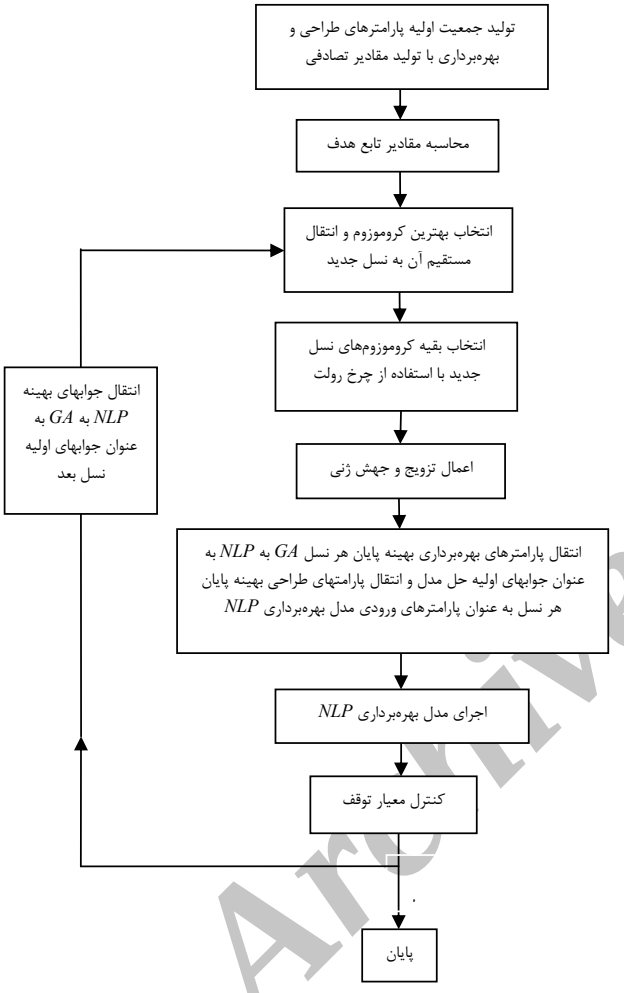
در سالهاي اخير GA با استفاده از اعداد حقيقي، قابليت استفاده در مسائل بهينه‌سازي پيوسته از قبيل مسائل بهينه‌سازي منابع آب را دارا مي‌باشد. GA از مجموعه‌اي از جوابهاي تصادفي اوليه به نام جمعيت آغاز مي‌شوند. هر جزء از جمعيت كروموزوم ناميده مي‌شود كه اين كروموزوم‌ها در تكرارهاي موفق كه نسل ناميده مي‌شوند متحول مي‌شوند. براي تشكيل نسل بعد كروموزوم‌هاي جديد كه فرزندان ناميده مي‌شوند توسط عملگرهاي تزويج و جهش ژني توليد مي‌شوند. نسل بعد هم از روي انتخاب بر اساس مقدار تابع برازش والدين و فرزندان و يا حذف ديگران براي ثابت نگه داشتن جمعيت شكل مي‌گيرد. اين روند ايجاد نسل به صورت تدريجي در ايجاد تكامل و بهبود بخشي جواب‌ها ادامه پيدا مي‌كند و بعد از چندين نسل الگوريتم به سمت بهترين كروموزوم هدايت مي‌شود. در نمونه‌گيري تصادفي تعداد واقعي كروموزوم‌هاي مورد تكثير بر اساس احتمال زنده ماندن آن كروموزوم تعيين مي‌شود. شناخته شده‌ترين اين دسته روش‌ها انتخاب برپايه چرخ رولت است كه احتمال زنده ماندن براي هر كروموزوم بر اساس مقدار تابع برازش آن تعيين مي‌شود. از ديگر عملگرهاي ژنتيک، تزويج است كه براي تركيب دو كروموزوم از والدين و ايجاد فرزندان جديد انجام مي‌شود. روشهاي تزويج برش يک نقطه‌اي، برش دو نقطه‌اي، برش چند نقطه‌اي و تزويج يكنواخت، از انواع متداول تزويج است. در اين عملگر احتمال تزويج (P_c) به صورت نسبتي از تعداد فرزندان توليد شده از هر نسل به تعداد افراد نسل حاضر تعريف مي‌شود. جهش ژني نيز عملگر ديگري است كه مي‌تواند تغييرهايي در يک يا چند ژن از يک كروموزوم به وجود آورد. در GA جهش ژني نقش حساسي را به يكي از دو شكل جابه‌جايي ژنهاي گمشده نسل در طول فرآيند انتخاب به شكل يک كروموزوم جديد و يا داخل كردن ژنهايي كه در نسل حاضر موجود نيستند به نسل جديد، ايفا مي نمايد. احتمال جهش (P_m) به صورت درصدي از مجموعه ژنهاي هر نسل بيان مي‌شود. در اين تحقيق از GA با نخبه‌گرايي استفاده شده است. در اين فرمول‌بندي پس از توليد تصادفي كروموزوم‌ها با در نظر گرفتن قيود مسئله و به تعداد جمعيت پاسخ، كروموزوم‌ها بر اساس مقدار برازندگي مرتب شده و بهترين آنها به طور مستقيم به نسل بعد انتقال مي‌يابد. سپس با استفاده از انتخاب چرخ رولت، كروموزوم‌هاي لازم براي تكميل نسل بعد از مجموعه جواب نسل قبل انتخاب مي‌شوند. بعد از اين مرحله عملگر تزويج وارد عمل شده و بر اساس احتمال مورد نظر (P_c) بر روي جفت كروموزوم‌هاي نسل جديد اعمال مي‌شود. نكات قابل توجه در اين زمينه استفاده از انواع روشهاي تزويج، احتمال‌هاي متفاوت و انتخاب بهترين عملگر در طي تحليل حساسيت مربوط مي‌باشد. در ضمن هر كدام از كروموزوم‌ها حداكثر يكبار مورد تزويج ژني قرار مي‌گيرند. عملگر جهش ژني در مرحله بعد و بر اساس احتمال مورد نظر (P_m) روي ژن‌هاي اطلاعاتي كروموزوم‌هاي نسل جديد اعمال مي‌شود. در اين مرحله نيز امكان استفاده از انواع روش‌ها و احتمال‌هاي متفاوت براي عملگر جهش وجود دارد. با پايان اعمال عملگرهاي ژنتيكي، مجموعه‌اي از پاسخ‌هاي جديد بر اساس برازندگي مرتب شده و بهترين پاسخ اعلام مي‌شود. فرآيند بالا تا جايي ادامه مي‌يابد كه

معیار توقف برنامه که در این حالت رسیدن به تعداد تکرارهای مشخص است ارضاء شود.

مدل ترکیبی **NLP-GA**

همانطور که قبلاً اشاره شد، روشهاي گرادیان پایه از جمله NLP داراي مشکلاتي از جمله گیر افتادن در محدوده‌اي محصور و یا اعلام بهینه محلي به جاي بهینه سراسري، مي‌باشند. از طرف دیگر روشهاي فراکاوشي در کنار تمام قابلیت هایي که دارا مي‌باشند هیچ گاه در آنها تضمیني قطعي براي رسیدن به جواب بهینه سراسري و همگرایي کامل مدل وجود ندارد و حتي در صورت همگرایي، جواب‌هاي نزدیک به بهینه سراسري را نتیجه مي‌دهند. بنابراین استفاده از الگوریتم‌هاي ترکیبي که در آنها هم از مزایاي سرعت روشهاي برنامه‌ریزي غیر خطي و هم از مزایاي جستجوي هوشمند الگوریتمهاي تکاملي بهره‌گیري مي‌شود، مي‌تواند در صورت فرمول بندي صحیح مسئله بسیار کمک کننده باشد و مشکلات روشهاي NLP و الگوریتمهاي تکاملي را برطرف نماید. در اینجا نوع خاصي از الگوریتم ترکیبي توسعه داده شده است که به موجب آن با ترکیب GA و NLP و استفاده همزمان هر دو روش در هر تکرار، مسئله مورد بررسي قرار مي‌گیرد. تفاوت این الگوریتم ترکیبي با الگوریتم‌هاي ترکیبي دیگري که این دو روش بهینه‌سازي را با یکدیگر ترکیب نموده‌اند در این است که، در اینجا از هر دو روش در هر تکرار بهینه‌سازي براي تولید جوابهاي اولیه یکدیگر استفاده شده است. به این ترتیب که در هر نسل GA پس از طي مراحل بهینه‌سازي توسط GA، متغیرهاي طراحي بهینه شده به عنوان داده‌هاي ورودي NLP و متغیرهاي بهره‌برداري بهینه به عنوان داده‌هاي اولیه NLP وارد NLP شده و پس از اجراي مدل NLP پارامترهاي طراحي و بهره‌برداري بهینه شده از این مرحله به عنوان جواب‌هاي اولیه نسل بعد GA وارد GA شده و این عمل در هر تکرار صورت مي‌گیرد تا مسئله به سمت جواب بهینه سراسري همگرا شود. با انجام این مراحل انتظار مي‌رود که استفاده همزمان هر دو روش در هر تکرار، نیاز به تعداد نسل بالا در GA را براي همگرایي کم کرده و با تولید پاسخ‌هاي اولیه مناسب براي روش NLP، سرعت همگرایي مسئله را براي یافتن پاسخ بهینه سراسري افزایش دهد.

به منظور ترکیب NLP با GA، نرم افزار Lingo به Excel مرتبط شده و با کد نویسي مدل NLP و GA در محیط Visual Basic و ادغام آنها با یکدیگر، الگوریتم ترکیبي مورد نظر حاصل شده است. در این فرمول بندي پس از تولید تصادفي کروموزوم‌ها با در نظر گرفتن قیود مسئله و به تعداد جمعیت، کروموزوم‌ها بر اساس مقدار برازندگي مرتب شده و بهترین متغیرهاي آنها به عنوان جوابهاي اولیه وارد NLP شده و جوابهاي بدست آمده به طور مستقیم به نسل بعد انتقال مي‌یابند. این عمل تا جایي تکرار مي‌شود که جوابها به سمت بهینه سراسري همگرا شده و جواب بهینه ممکن حاصل شود. شکل (۱) روندنماي روش ترکیبي NLP-GA را نشان مي‌دهد.



شکل ۱- روندنماي **NLP-GA**

مدل طراحي و بهره‌برداري بهینه از ایستگاه‌هاي پمپاژ

در این تحقیق طراحي و بهره‌برداري بهینه همزمان از ایستگاه‌هاي پمپاژ با هدف انتقال آب جهت تأمین نیاز کشاورزي ارائه شده است. تابع هدف در این مسئله کمینه نمودن مجموع هزینه‌هاي طراحي و بهره‌برداري یعني به ترتیب هزینه خرید پمپ و هزینه انرژي مصرفي مي‌باشد. به این ترتیب متغیرهاي تصمیم مسئله، نوع و تعداد پمپ‌هاي مصرفي و دبي پمپاژ شده از هر پمپ در دوازده ماه سال مي‌باشد. تابع هدف در این مسئله به صورت زیر تعریف مي‌شود:

$$\text{Min}(ATC) = \sum_{i=1}^{n} C_{RF}.C'_i + C_E.E_T \qquad (۲)$$

$$C'_i = (1+\frac{r\times TC}{2}).C_i \qquad \forall i = 1,2,...,n \qquad (۳)$$

كه در آن، ATC = كل هزينه معادل سالانه، n = تعداد پمپ‌ها، C_{RF} = نرخ بازگشت سرمايه، Ci = قيمت iامين پمپ، C'_i = قيمت iامين پمپ بعد از دوره ساخت، CE = قيمت واحد انرژي، ET = كل انرژي مصرفي سالانه، r = نرخ بهره و TC = طول دوره ساخت مي‌باشد.

انرژي مصرفي سالانه برابر است با:

$$E_T = \rho.g\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\frac{Q_{i,j}.H_{i,j}(Q_{i,j})}{e_{i,j}(Q_{i,j},H_{i,j})}.\Delta t \qquad (۴)$$

كه در آن، ρ = چگالي آب، g = شتاب ثقل، $Q_{i,j}$ = دبي پمپاژ شده از پمپ i ام در بازه زماني jام، $H_{i,j}$ = هد پمپ i ام در بازه زماني jام، $e_{i,j}$ = راندمان پمپ iام در بازه زماني jام، Δt = بازه زماني دوره بهره‌برداري مي‌باشد. مشاهده مي‌شود راندمان پمپ تابعي از دبي پمپاژ شده از پمپ و ارتفاع پمپاژ مي‌باشد. اما به دليل ساده‌سازي و كاهش حجم معادلات، در اينجا كارائي پمپ، تنها تابعي از آبدهي پمپ در نظر گرفته مي‌شود. فرض مذكور در عمل هم چندان دور از واقعيت نيست و تحقيقات نشان مي‌دهد كه وابستگي راندمان پمپ‌ها به دبي پمپاژ خيلي بيشتر از وابستگي آن به ارتفاع پمپاژ موجود است. با در نظر گرفتن رابطه درجه دو بين دبي و كارائي به صورت $e_{i,j}(Q_{i,j}) = a_i\,Q_{i,j}^2 + b_i\,Q_{i,j} + c_i$ انرژي مصرفي سالانه برابر است با:

(۵)

$$E_T = \rho.g.\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} H_{i,j}(Q_{i,j}).\frac{Q_{i,j}}{(a_i.Q_{i,j}^2 + b_i.Q_{i,j} + c_i)}.\Delta t$$

ساير محدوديت‌هاي مربوط به پمپ‌ها عبارتند از:

$$0 \le Q_{i,j} \le Q\max_i \qquad \forall j = 1,2,...,m \qquad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^{n} Q_{i,j} = (Q_N)_j \qquad \forall j = 1,2,...,m \qquad (۷)$$

$$H_{\min_i} \le H_{i,j} \le H_{\max_i} \qquad \forall j = 1,2,...,m \qquad (۸)$$

كه در آن، $(Q_N)_j$ = كل دبي مورد نياز در بازه زماني jام، Q_{maxi} = بيشينه دبي مجاز از پمپ iام، H_{maxi} = بيشينه هد مجاز پمپ iام و H_{mini} = كمينه هد مجاز پمپ iام مي‌باشد. تمام اين محدوديت‌ها براي تمام پمپ ها در همه بازه‌هاي زماني بايد رعايت شود.

نتايج و بحث

مسئله رياضي

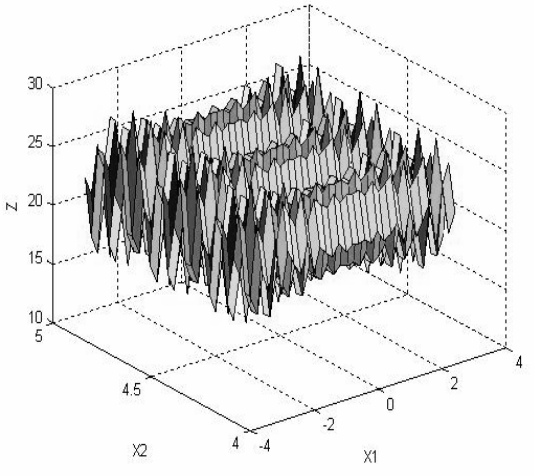
به منظور بررسي كارايي الگوريتم ابداعي، ابتدا يك مثال رياضي توسط اين روش حل شده است. مثال رياضي حل شده توسط اين الگوريتم، تابع سينوسي نامقيد مي‌باشد. اين مسئله بيشينه‌سازي سينوسي نامقيد، داراي متغيرهاي تصميم پيوسته مي‌باشد. در رابطه‌هاي (۹)، (۱۰) و (۱۱) به ترتيب تابع هدف و حدود متغيرهاي تصميم ارائه شده است. در شكل (۲) رويه اين تابع نمايش داده شده است.

$$Max.\ f(x_1,x_2) = z = 21.5 + x_1 Sin(4\pi x_1) + x_2 Sin(20\pi x_2) \qquad (۹)$$

$$-3 \le x_1 \le 12.1 \qquad (۱۰)$$

$$4.1 \le x_2 \le 5.8 \qquad (۱۱)$$

اين تابع داراي دو متغير تصميم مي‌باشد. همانطور كه در شكل (۲) مشخص است، اين تابع به صورت چندقله‌اي و تفكيك‌ناپذير مي‌باشد.



شكل ۲- رويه تابع سينوسي نامقيد

حل اين مثال به روش NLP توسط نرم‌افزار Lingo 11 و به روش GA و NLP-GA توسط كد نوشته شده در محيط Basic Visual انجام شده است.

نتايج بدست آمده از بهينه‌سازي اين مثال در دو حالت سراسري و محلي توسط روش NLP در جدول (۱) آورده شده است. از آنجا كه GA يكي از الگوريتم‌هاي فراكاوشي بوده و اين الگوريتم‌ها تقريبي و اغلب غير قطعي مي‌باشند و در طول دوره بهينه‌سازي از مقادير تصادفي استفاده مي‌كنند، در تحليل نتايج الگوريتم از نتايج ۱۰ اجراي مختلف الگوريتم استفاده شده است. با حل اين مسئله توسط GA نتايج زير بدست آمد. مقدار

جمعیت و تعداد نسل‌هاي در نظر گرفته شده به ترتیب ۵ و۵'۰۰۰ مي‌باشد. P_c وP_m به ترتیب ۷۰ و ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. مقادیر تابع هدف در ۱۰ بار اجراي برنامه و در پایان آخرین نسل در جدول (۲) ارائه گردیده است. از طرفي پارامترهاي آماري این مقادیر در جدول (۳) ارائه گردیده است.

جدول ۱- نتایج روش ***NLP*** در دو حالت سراسري و محلي

برنامه‌ریزي غیرخطي	متغیر تصمیم اول	متغیر تصمیم دوم	مقدار تابع هدف	تعداد دفعات ارزیابي تابع هدف
بهینه سراسري	۵/۷۲۷۹	۱۱/۶۳۱۴	۳۸/۸۵۹۱	۴۰۶
بهینه محلي	۰	۴/۸۲	۲۶/۳۲	۱۰۴

جدول۲- مقادیر تابع هدف در ۱۰ بار اجراي **GA** و در پایان ۵'۰۰۰ امین نسل

	شماره اجرا									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تابع هدف	۳۸/۷۹۸۷	۳۸/۸۲۵۰	۳۸/۸۵۴۸	۳۸/۸۲۴۲	۳۸/۸۵۷۵	۳۸/۷۷۶۶	۳۸/۷۶۳۶	۳۸/۸۵۳۰	۳۸/۸۵۷۰	۳۸/۸۵۰۵

جدول ۳- پارامترهاي آماري تابع هدف در ۱۰ بار اجراي **GA** و در پایان ۵'۰۰۰ امین نسل

	کمینه	متوسط	بیشینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
تابع هدف	۳۸/۷۶۳۶	۳۸/۸۲۶۱	۳۸/۸۵۷۵	۰/۰۳۵۲۷	۰/۰۰۰۹

همانگونه که ملاحظه مي گردد مقادیر تابع هدف در پایان این ۱۰ اجرا بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و داراي انحراف معیار و ضریب تغییرات بسیار کوچکي مي باشند. اما مشاهده مي‌شود که با گذشت ۵'۰۰۰ نسل هیچ کدام از اجراها به مقدار بهینه سراسري نرسیده‌اند و تنها نقاط نزدیک به بهینه سراسري را نتیجه داده‌اند که این یکي از ضعف‌هاي این روش به شمار مي‌رود.

در مرحله بعد این مسئله توسط الگوریتم ترکیبي NLP-GA بهینه‌سازي شد. تعداد نسل و مقدار جمعیت در نظر گرفته شده به ترتیب ۱۰ و ۵ بوده است. P_c وP_m به ترتیب ۷۰ و ۱۰ در صد در نظر گرفته شد. با حل این مسئله توسط NLP-GAنتایج زیر بدست آمد. مقادیر تابع هدف در ۱۰ بار اجراي برنامه و در پایان آخرین نسل در جدول (۴) ارائه گردیده است. از طرفي پارامترهاي آماري این مقادیر در جدول (۵) ارائه گردیده است.

همان گونه که ملاحظه مي‌گردد مقادیر تابع هدف در پایان این ۱۰ اجرا به یکدیگر نزدیک بوده و داراي انحراف معیار و ضریب تغییرات کوچکي مي‌باشند. که این نشان‌دهنده عملکرد خوب این روش در پیدا کردن نقطه بهینه سراسري مي‌باشد.

جدول ۴- مقادیر تابع هدف در ۱۰ بار اجراي ***NLP-GA*** و در پایان ۱۰ امین نسل

	شماره اجرا									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تابع هدف	۳۸/۱۱۳۴	۳۷/۷۱۳۳	۳۷/۷۱۳۲	۳۸/۸۵۹۱	۳۸/۲۱۳۵	۳۸/۰۱۳۴	۳۸/۴۱۳۶	۳۸/۸۵۹۱	۳۸/۲۱۳۵	۳۸/۴۱۳۶

جدول ۵- پارامترهاي آماري تابع هدف در ۱۰ بار اجراي ***NLP-GA*** و در پایان ۱۰ امین نسل

	کمینه	متوسط	بیشینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
تابع هدف	۳۷/۷۱۳۲	۳۸/۲۱۸۰	۳۸/۸۵۹۱	۰/۳۳۲۹	۰/۰۰۰۸۹

مطالعه موردي مسئله ایستگاه پمپاژ

جهت بررسي مدل بهینه‌سازي تهیه شده در به‌گزیني مؤلفه‌هاي ایستگاه‌هاي پمپاژ، طرح ایستگاه پمپاژ مجتمع کشت و صنعت فارابي در نظر گرفته شده است. این ایستگاه، آب مورد نیاز ۲۰'۰۰۰ هکتار از اراضي کشاورزي را در استان خوزستان تأمین مي‌کند. در این پروژه با توجه به مساحت زیر کشت و نیاز آبي بر اساس مصارف کشاورزي منحني میزان تقاضاي آب براي واحد ایستگاه پمپاژ اصلي براي ماههاي مختلف سال بدست آمده است. بدین ترتیب جواب مسئله شامل تعیین نوع پمپ و میزان دبي پمپاژ شده از هر پمپ در هر ماه مي‌باشد که حداکثر

پمپ مورد استفاده ۱۰ عدد از چهار نوع پمپ در دسترس مي‌باشد. در طرح فوق جهت طراحي ايستگاه پمپاژ سه گزينه مختلف مدنظر قرار گرفته است و بررسي اقتصادي فقط در مورد اين سه گزينه صورت گرفته است و طرح بهينه از ميان اين سه گزينه انتخاب شده است. با بررسي اقتصادي بين سه گزينه، در نهايت گزينه اول به عنوان گزينه بهينه انتخاب شد كه در آن ۱۶ پمپ نوع سوم به عنوان پمپهاي كاربردي در نظر گرفته شدند (Moradi-Jalal et al., 2003). در حالي‌كه در مدل تهيه شده در تحقيق حاضر تمامي گزينه‌هاي مختلف و امكان پذير مورد بررسي قرار مي‌گيرد و در نهايت بهترين گزينه انتخاب مي‌گردد.

در اين تحقيق هدف آنست كه با استفاده از الگوريتم تركيبي NLP-GA، نحوه طراحي و دستورالعمل بهره‌برداري بهينه همزمان از اين ايستگاه پمپاژ ارائه شده و در نهايت جوابهاي بهينه بدست آمده از اين الگوريتم با جوابهاي بهينه بدست آمده از روش LM (Moradi-Jalal et al., 2003)، GA (Moradi-Jalal et al., 2004) و الگوريتم HBMO (Bozorg Haddad & Marino; 2008) در تحقيقات قبلي مقايسه شده تا كارائي آن مشخص شود.

با توجه به اينكه مسئله طراحي و بهره‌برداري از ايستگاه‌هاي پمپاژ يک مسئله برنامه‌ريزي غيرخطي در حالت بزرگ مقياس و آميخته با اعداد صحيح مي‌باشد، با حل اين مسئله با روش برنامه‌ريزي غير خطي توسط نرم افزار Lingo 11 پس از گذشت زمان طولاني از اجراي برنامه نتيجه‌اي حاصل نشد و اين روش قادر به پيدا كردن پارامترهاي بهينه طراحي و بهره‌برداري نه در حالت محلي و نه در حالت سراسري نبود. تعداد نسل و جمعيت در نظر گرفته شده ۵ و ۵ بوده است. P_c و P_m به ترتيب ۵۰ و ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است و مقادير تابع هدف در ۱۰ بار اجراي برنامه و در پايان آخرين نسل در جدول (۶) ارائه گرديده است. از طرفي پارامترهاي آماري اين مقادير در جدول (۷) ارائه گرديده است.

جدول ۶- مقادير تابع هدف مسئله ايستگاه پمپاژ در ۱۰ بار اجراي ***NLP-GA*** و در پايان پنجمين نسل

شماره اجرا	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تابع هدف (10^6 ريال)	۱۸۸/۰۷	۲۰۱/۳۴	۱۸۷/۷۹	۱۹۶/۸۹	۱۹۳/۶۸	۱۹۷/۰۵	۱۹۵/۴۶	۱۹۱/۸۶	۲۰۰/۶۰	۱۹۶/۵۹
تعداد دفعات ارزيابي براي جواب بهينه	۵۹۸'۲۳۳	۵۸۳'۱۹۴	۵۰۶'۱۸۳	۶۲۸'۲۱۳	۸۶۵'۲۶۴	۴۹۲'۱۵۹	۸۷۰'۶۰	۹۵۸'۲۷۰	۷۸۵'۲۹۴	۰۴۳'۱۸۷

جدول ۷- پارامترهاي آماري تابع هدف مسئله ايستگاه پمپاژ در ۱۰ بار اجراي ***NLP-GA*** و در پايان پنجمين نسل

پارامترهاي آماري	كمينه	متوسط	بيشينه	انحراف معيار	ضريب تغييرات
كل هزينه سالانه (10^6 ريال)	۱۸۷/۷۹	۱۹۴/۹۳	۲۰۱/۳۴	۴/۶۳	۰/۰۲
تعداد دفعات ارزيابي براي جواب بهينه	۸۷۰'۶۰	۲۰۶'۳۳۲/۸	۷۸۵'۲۹۴	۶۷'۱۷۱/۰۴	۰/۳۲

همانگونه كه ملاحظه مي‌گردد مقادير تابع هدف در پايان اين ۱۰ اجرا به يكديگر نزديک بوده و داراي انحراف معيار و ضريب تغييرات كوچكي مي‌باشند كه اين نشان‌دهنده اين است كه با تعداد اجراهاي كم اين روش، مي‌توان به نتايج قابل اعتمادي دست يافت و براي كاربرد آن نيازي به اجراهاي زياد اين الگوريتم نمي‌باشد. همچنين مشاهده شد در اجراي سوم مقدار تابع هدف تابع هدف به مقدار بهينه ۱۸۷/۷۹ رسيده است.

در جدول (۸) مشخصات سه گزينه كاربردي و مجموعه‌هاي بهينه بدست آمده از LM، GA، HBMO و NLP-GA آورده شده است. هزينه‌هاي طراحي و بهره‌برداري هر كدام از اين مجموعه‌ها در جدول (۹) آورده شده است. لازم به ذكر است كه نتايج استفاده شده در بخش HBMO شامل دو بخش نتايج قسمت استفاده از تابع جريمه پويا (D-HBMO) و تابع جريمه ايستا (S-HBMO) مي‌باشد كه در روش استفاده از تابع جريمه پويا، تابع هدف بهتري نسبت به تابع جريمه ايستا حاصل شده است.

نتايج ارائه شده در جدول (۸) نشان مي‌دهد در روش‌هاي LM، D-HBMO، S-HBMO و NLP-GA، ۱۰پمپ به عنوان تعداد پمپ‌هاي مصرفي بهينه انتخاب شده‌اند و در روش GA نه پمپ انتخاب شده است.

جدول ۸- مشخصات مجموعه‌هاي كاربردي و مجموعه‌هاي بهينه بدست آمده از چهار روش ***LM***، ***GA***، ***HBMO*** و ***NLP-GA***

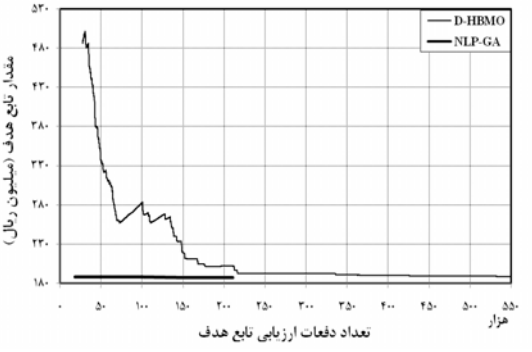
نوع پمپ	گزينه اول	گزينه دوم	گزينه سوم	*LM*	*GA*	*D-HBMO*	*S-HBMO*	*NLP-GA*
۱	۰	۰	۵	۳	۴	۳	۳	۳
۲	۰	۱۴	۰	۴	۲	۴	۳	۲
۳	۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۳
۴	۰	۰	۳	۳	۳	۳	۱	۲
کل	۱۶	۱۴	۸	۱۰	۹	۱۰	۱۰	۱۰

جدول ۹- هزينه‌هاي طراحي و بهره‌برداري و كل معادل ساليانه در روش‌هاي مختلف

هزينه معادل سالانه (10^6 ريال)	گزينه اول	گزينه دوم	گزينه سوم	*LM*	*GA*	*D-HBMO*	*S-HBMO*	*NLP-GA*
طراحي	۱۲۶/۱	۱۱۸/۶	۱۲۳/۵	۱۱۴/۷	۱۱۹/۱	۱۱۴/۷	۱۱۸/۷	۱۱۵/۸
بهره‌برداري	۱۰۲/۲	۱۱۴/۶	۱۰۵/۶	۶۷/۷	۷۱/۵	۷۲/۴	۷۱	۷۲
كل	۲۲۸/۳	۲۳۳/۲	۲۲۹/۱	۱۸۲/۴	۱۹۰/۶	۱۸۷/۱	۱۸۹/۷	۱۸۷/۸

همانطور كه در جدول (۹) مشاهده مي‌شود، با توجه به كاربرد مشكل و محاسبات پيچيده روش LM، چهار روش ديگر با يكديگر مقايسه شده‌اند. در بين اين چهار روش مقدار تابع هدف حاصل شده از الگوريتم تركيبي و الگوريتم D-HBMO از بقيه روشها بهتر مي‌باشند و در هر دو روش تقريباً يک مقدار تابع هدف بدست آمده است. البته ميزان هزينه بهره‌برداي سالانه در روش NLP-GA به ميزان ۰/۵ درصد از روش D-HBMO كمتر بوده و ميزان هزينه پمپها در روش HBMO-D به ميزان ۰/۹ درصد از روش NLP-GA كمتر مي‌باشد.

در شكل (۳) مقايسه نمودارهاي كمينه توابع هدف در ۱۰ اجرا بر حسب دفعات ارزيابي تابع هدف در دو روش D-HBMO و NLP-GA به منظور مقايسه كارآئي اين دو الگوريتم با يكديگر ارائه گرديده است.



شكل ۳- تغييرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد دفعات ارزيابي تابع هدف

همانطور كه مشاهده مي‌شود، در روش بهينه‌سازي NLP-GA در تعداد دفعات ارزيابي تابع هدف بسيار كمتري نسبت به روش بهينه‌سازي D-HBMO تقريباً همان مقدار تابع هدف حاصل شده است و در همان تكرارهاي اول جواب‌هاي خوبي حاصل شده است. همچنين در اين نمودار سرعت همگرايي بالاي اين روش و در نتيجه صرف زمان كمتر در رسيدن به جواب بهينه توسط اين روش مشخص مي‌باشد.

نتيجه‌گيري كلي

در اين تحقيق سعي بر آن است تا با ارزيابي پتانسيل فرمول‌بندي‌هاي جديد و كاربردي GA در حل مسائل مهندسي، ساختاري نوين به منظور بهينه‌سازي طراحي و بهره‌برداري از ايستگاه‌هاي پمپاژ با استفاده از GA تهيه و ارزيابي شود. بدين منظور از يک الگوريتم تركيبي NLP-GA در يك مسئله رياضي و يک مسئله طراحي و بهره‌برداري از ايستگاه پمپاژ و استفاده شده است. با استفاده از اين الگوريتم در هر تكرار پارامترهاي طراحي و بهره‌برداري توسط GA بهينه شده و پارامترهاي بهره‌برداري توسط NLP بهينه شده‌اند. نتايج اجراي الگوريتم NLP-GA نشان داد كه اين الگوريتم داراي سرعت بالاتري در همگرا شدن به سمت نقطه بهينه سراسري نسبت به الگوريتم GA مي‌باشد و جواب بسيار بهتري را نسبت به GA نتيجه مي‌دهد. همچنين اين الگوريتم چه به لحاظ كيفيت جوابها و چه به لحاظ سرعت همگرايي در رسيدن به جواب بهينه و چه به لحاظ انحراف معيار و ضريب تغييرات در مسئله پمپاژ از روشهاي LM، GA، S-HBMO و D-HBMO ديگر بهتر عمل كرده و نتايج بهتري را نتيجه داده است. از طرفي ديگر مشاهده شد كه الگوريتم تركيبي پيشنهاد شده عملكرد بسيار خوبي در بهينه‌سازي مسائلي دارد كه در حل با روش‌هاي سنتي از جمله برنامه‌ريزي غيرخطي با مشكل روبرو شده و نتيجه‌اي را حاصل

نمي‌دهند. انحراف معيار و ضريب تغييرات كم نتايج ده اجراي اين الگوريتم نشان داد كه با تعداد اجراهاي كم اين الگوريتم نيز مي‌توان به نتايج قابل قبول و قابل اعتمادي دست يافت.

نمادها

ضرائب رابطه دبي راندمان در پمپ iام	a_i , b_i , c_i
بيشينه هد مجاز پمپ iام (متر)	$H_{max\,i}$
قيمت واحد انرژي (ريال به ازاي هر كيلو وات ساعت)	C_E
كمينه هد مجاز پمپ iام (متر)	H_{mini}
قيمت iامين پمپ (ريال)	C_i
دبي نياز در ماه jام (متر مكعب بر ثانيه)	$(Q_N)_j$
قيمت تنزيل شده iامين پمپ بعد از دوره ساخت (ريال)	C_i'
دبي پمپاژ شده از پمپ iام در بازه زماني jام	$Q_{i,j}$
كل هزينه معادل سالانه	ATC
نرخ بازگشت سرمايه	CRF
كل انرژي مصرفي سالانه (كيلو وات ساعت)	E_T
بيشينه دبي مجاز از پمپ iام (متر مكعب بر ثانيه)	Q_{maxi}
راندمان پمپ iام در بازه زماني jام	$e_{i,j}$
دوره ساخت (سال)	TC
هد پمپ iام در بازه زماني jام (متر)	$H_{i,j}$
بازه زماني پمپاژ	Δt
چگالي آب	ρ
تعداد پمپها	n
شتاب ثقل	g

REFERENCES

Attarzade, A., Mousavi, J. and, Tahershamsi, A. (2008). Estimation of optimal reservoir storage with a control on supply reliability applying hybrid genetic algorithm and linear programming. *3rd Water Resources Management Conference*, Tabriz, Iran, October 15.

Boulos, P. F., Wu, Z. Y., Orr, C. H., Moore, M., Hsiuing, P., and, Thomas, D. (2001). Optimal operation of water distribution systems using genetic algorithms. *Proceedings of AWWA Distribution System Symposium*, San Diego, CA, USA ,September 23-26.

Bozorg Haddad, O., and, Marino, M. A. (2007). Dynamic penalty function as a strategy in solving water resources combinatorial optimization problems with honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm. *Journal of Hydroinformatics*, 9 (3), 233-250.

Cisty, M. (2009). Hybrid genetic algorithm and linear programming method for least-cost design of water distribution systems. *Water Resources Management*, 24(1), 1-24.

Hillier, F.S., and, Liberman, G.J. (1980). Introduction to operation research. Holden-Day Inc.

Mackle, G., Savic, D. A., and, Walters, G. A. (1995). Application of genetic algorithms to pumpscheduling for water supply. GALESIA 95, *Conference Publication* 4/4,400-405, London: Institute of Electrical Engineers, September 12-14.

Moradi-Jalal, M., Marino, M. A., and, Afshar, A. (2003). Optimal design and operation of irrigation pumping station. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(3), 149-154.

Moradi-Jalal, M., Sergey, I., Rodin, S. I., and, Hon, M. (2004). Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping station. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(5), 357-365.

Ormsbee, L. E., Walski, T. M., Chase, D. V., and, Sharp, W. W. (1989). Methodology for improving pump operation efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management.*, 115(2), 148–164.

Rajabpour, R., and, Afshar, M.H. (2008). Optimized Operation of Serial Pump Station. *Journal of Water and Wastewater*, 19(66), 56-66.

Reis, L. F. R., Walters, G. A. D. and, Chaudhry, F. H. (2005). Multi-reservoir operation planning using hybrid genetic algorithm and linear programming (GA-LP): An Alternative Stochastic Approach. *Water Resources Management*, 19 (6), 831–848.

Rodin, S. I., and, Moradi-Jalal, M. (2002). Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations, WAPIRRA program. <http://stullia.t-k.ru/waterpump/waterpump.htm> (June 10, 2002).